Journal of Environmental Science International
28(9); 719~727; September 2019

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2019.28.9.719

ORIGINAL ARTICLE

C/N비 변화가 호기성 그래뉼 슬러지의 안정성에 미치는 영향

김현구[1)] · 안대희[1,2)*]

[1)]주식회사 블루뱅크, [2)]명지대학교 환경에너지공학과

Effects on the Stability of Aerobic Granular Sludge (AGS) at Different Carbon/Nitrogen Ratio

Hyun-Gu Kim[1)], Dae-Hee Ahn[1,2)*]

[1)]BlueBank Co., Ltd., Business incubator center, Myongji University, Yongin 17058, Korea

[2)]Department of Environmental Engineering and Energy, Myongji University, Yongin 17058, Korea

Abstract

In this study, the effect on the stability of Aerobic Granular Sludge (AGS) with different Carbon/Nitrogen (C/N) ratios was investigated. The C/N ratios were controlled to 10.0, 7.5, 5.0, and 2.5 using the sequencing batch reactor, and the results showed that the removal efficiency of organic matter and total nitrogen decreased simultaneously with the decrease of C/N ratio. The removal efficiency of organic matter and total nitrogen at C/N ratio of 2.5 was 70.7% and 52.3% respectively. In addition, the AGS/mixed liquor suspended solids (MLSS) ratio showed a tendency to decrease from 85.7% to 73.7%, while the sludge volume index showed a tendency to increase from 82 mL/g to 102 mL/g as the C/N ratio decreased. At the same time, the apparent deviation of polysaccharide (PS) content in extracellular polymeric substances was observed, and polysaccharides/protein (PS/PN) ratio decreased from 0.62 to 0.31 as the C/N ratio decreased. Optical microscope observations showed that the reduction in C/N ratio caused the growth of filamentous bacteria and significantly affected the stability of AGS.

Key words : Aerobic granular sludge, C/N ratio, Organic matter, Nitrogen, Extracellular polymeric substances

1. 서 론

호기성 그래뉼화는 제어된 조건에서 느슨한 바이오매스를 고밀도의 컴팩트한 그래뉼로 변환시키는 자가 고정화 과정으로 설명된다. 호기성 그래뉼 슬러지는 규칙적인 모양과 컴팩트한 구조, 탁월한 침강능력, 높은 바이오매스 축적, 독성 화합물 및 높은 유기성 부하에 대한 우수한 저항성과 더불어 영양염류 제거효율에 있어 기존 활성슬러지에 비하여 우수한 특성을 나타낸다(Wang et al., 2015; Wei et al., 2015; Cai et al., 2018; Carrera et al., 2019). 이러한 특징으로 인해 AGS 기술은 하수뿐만 아니라 고강도 산업폐수 처리에도 널리 사용되고 있다 (Caluwé et al., 2017; Ren et al., 2017; Corsino et al., 2017; Vashi et al., 2018)

호기성 그래뉼 슬러지의 안정성은 다양한 분야에서 호기성 그래뉼 슬러지 기반 공정 적용을 위한 가장 중요한

Received 17 June, 2019; **Revised** 18 July, 2019;
Accepted 24 July, 2019
***Corresponding author**: Dae-Hee Ahn, Department of Environmental Engineering and Energy, Myongji University, Yongin 17058, Korea
Phone: +82-31-321-5901
E-mail: dhahn@mju.ac.kr

ⓒ The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

문제 중 하나로 볼 수 있으며 유입폐수 조성, C/N비 (Carbon/Nitrogen ratio), F/M비 (Food/Microorganisms ratio), 포기속도 및 온도 등을 포함한 다양한 요인들이 호기성 그래뉼 슬러지의 안정성과 관련되어 있다(Long et al., 2019; Yuan et al., 2019; Zhang et al., 2019). 이러한 변수 중 미생물의 성장과 영양염류 생분해를 위한 유입수 C/N비는 가장 중요한 요소 중 하나로 간주된다 (Wu et al., 2012). 예로, 유입수 편차가 심한 폐수처리에 호기성 그래뉼 슬러지 시스템을 적용할 경우, 그래뉼 안정성 저하, 분해 및 사상균 성장에 영향을 미칠 수 있는 결정적인 요소가 될 수 있다고 보고되고 있다(Yang et al., 2005; Kocaturk and Erguder, 2016). 또한 미생물에 의해 분비되어 호기성 그래뉼 슬러지의 형성 및 안정성에 기여하는 체외고분자 물질(Extracellular Polymeric Substances, EPS)은 주로 단백질(Protein, PN)과 다당류(Polysaccharides, PS) 등으로 구성되어 있으며 C/N비 변화에 따라 EPS의 농도 및 PS/PN 비율이 변화되어 그래뉼 안정성에 영향을 미칠 수 있다(Liu et al., 2004; Zhu et al., 2012).

225 톤/일 규모의 호기성 그래뉼 슬러지 기반 연속회분식 공정 파일롯 플랜트를 운영하여 영양염류 제거효율을 분석한 Mo et al.(2019)의 연구를 살펴보면 평균 C/N비가 약 3.14로 운영되었으며, C/N비가 2.0 이하일 경우, 질소 제거효율이 감소되는 경향을 나타낸다고 보고하고 있다. Luo et al.(2014)은 호기성 그래뉼 슬러지의 분해에 대한 낮은 C/N비 조건(4.0 이하)의 영향에 관한 연구를 수행하였으며, C/N비 2.0 및 1.0 조건에서는 그래뉼의 물리적 강도, 크기 및 침전성이 저하된다고 보고되고 있다. 그러나 그래뉼 안정성에 관한 기존 연구의 경우, C/N비 변화에 따른 호기성 그래뉼 슬러지의 형성 특성(물리적 특성)에 관한 연구가 주를 이루고 있으며, 공정 운영중의 생물반응조 전체 MLSS (Mixed Liquor Suspended Solids) 대비 호기성 그래뉼 슬러지 농도의 비율 분석을 통한 그래뉼 안정성 평가를 수행한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 이에 따라 C/N비 변화에 의한 호기성 그래뉼 슬러지 안정성 메커니즘을 보다 심도 있게 이해하기 위해서는 다양한 C/N비 적용을 통한 추가적인 연구가 필요하다. 따라서 본 연구의 목적은 C/N비 변화가 호기성 그래뉼 슬러지의 안정성에 미치는 영향 평가에 있다. 연속회분식 공정을 이용하여 조건별 C/N비 변화에 따른 유기물, 질소 제거효율을 평가하였으며 동시에 안정성 평가를 위한 물리적 특성(AGS/MLSS), EPS 함량 및 성분을 장기적으로 모니터링하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 유입수 성상 및 실험재료

실험에 사용된 유입수 성상은 조건별 C/N비 변화를 위하여 합성폐수를 제조하여 사용하였다. 유기물, 암모니아성 질소 및 알칼리도는 각각 $CH_3COONa \cdot 3H_2O$, NH_4Cl, $NaHCO_3$ (SAMCHUN Chemical, Korea)를 이용하여 제조하였다. 전체 운전기간 동안의 유입수 평균 pH는 7.1(6.9~7.3)로 유지되었으며, 알칼리도 및 T-N (Total Nitrogen)은 각각 204.8(190.0~218.0)

Table 1. Characteristics of the influent

Parameters		Unit	Influent			
			Min.	Max.	Average	S.D.*
COD_{Cr}	(C/N: 10.0)	(mg/L)	247.3	254.3	251.0	2.2
	(C/N: 7.5)		182.7	190.3	186.3	2.5
	(C/N: 5.0)		122.3	127.3	124.5	1.6
	(C/N: 2.5)		73.7	76.3	74.9	1.0
Total Nitrogen		(mg/L)	24.8	25.5	25.1	0.2
Alkalinity		(mg/L)	190.0	218.0	204.8	10.4
pH		-	6.9	7.3	7.1	0.2
Temperature		(℃)	23.9	24.2	24.0	0.1

*S.D.: Standard deviation

mg/L 및 25.1(24.8~25.5) mg/L로 유지되었다. C/N비는 점차적으로 감소되는 조건으로 설정하였으며, 유기물 농도를 변화시키며 10.0, 7.5, 5.0 및 2.5로 구분하였다. 호기성 그래뉼 슬러지는 실험실 규모의 반응기에서 자체 배양한 0.2 mm 이상 크기의 슬러지를 선별하여(80 mesh/0.2 mm STS Sieve) 사용하였으며, 초기 MLSS, MLVSS (Mixed Liquor Volatile Suspended Solids) 및 호기성 그래뉼 슬러지는 각각 2,870, 2,270 및 2,460 mg/L이었다. 전체 운전기간 동안의 유입수 성상을 Table 1에 나타냈다.

2.2. 실험장치 및 운전조건

실험에 사용된 반응기는 호기성 그래뉼 슬러지 형성 및 유지에 유리하다고 보고되는 연속회분식 반응기(Sequencing Batch Reactor, SBR)를 이용하였으며(Arrojo et al., 2004; Wang et al., 2007; Kishida et al., 2009), 유효용적 5 L (155 mm × 155 mm × 222 mm)의 아크릴 재질 반응기를 사용하였다(Fig. 1). 반응기에는 채수 및 분석을 위한 샘플링 포트와 포기를 위한 디퓨저를 설치하였으며 처리수는 교환율 50%를 적용하기 위하여 반응조 중간 포트를 통하여 유출시켰다(Su et al., 2013; Szabó et al., 2016; de Sousa Rollemberg et al., 2018). 연속회분식 반응기의 운전조건은 변수 최소화를 위해 6 cycle로 고정하여 운전하였으며 이에 따른 수리학적 체류시간(Hydraulic Retention Time, HRT)은 8 hr로 설정되었다. 단계별 운전시간은 유입&반응(10 min), 포기(210 min), 침전(10 min) 및 유출(10 min)으로 설정하였다. 전체 운전 기간 동안의 기기 장비 운전은 PLC (Programmable Logic Controller) 제어 프로그램을 사용하였으며 포기단계에서의 용존산소(Dissolved Oxygen, DO)는 1.0～2.0 mg/L, 고형물 체류시간(Solid Retention Time, SRT)은 15～20일 범위로 유지되었다. 실험실 규모 연속회분식 반응기의 운전조건을 Table 2에 나타냈다.

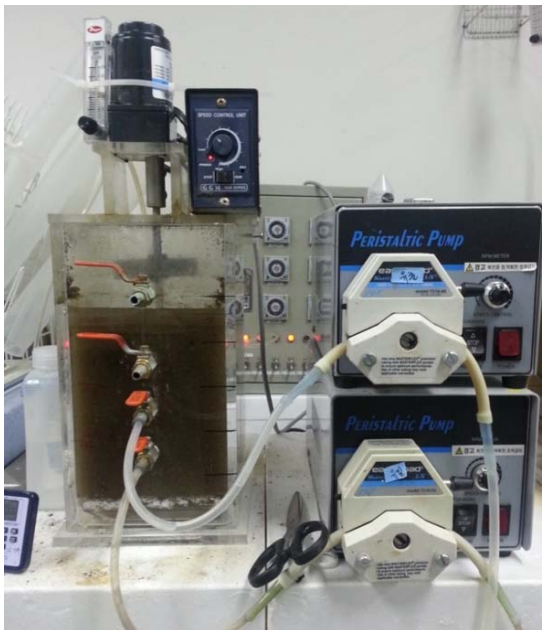

Fig. 1. Photograph of the lab. scale reactor.

2.3. 분석방법

유입수 및 처리수 시료의 유기물 (Chemical Oxygen Demand, COD)과 총질소(T-N) 성분은 흡광광도계(DR-4000, Hach, USA)를 이용하여 분석하였으며, 고형물은 MLSS와 MLVSS를 분석하였다(APHA, 2008). 또한 C/N비 변경에 따른 SVI_{30} (Sludge Volume Index) 값을 측정하여 호기성 그래뉼 슬러지의 침전 특성을 평가하였다(Campo et al., 2018). AGS/MLSS 비율은 슬러지 채취 후, 0.2 mm 이상 크기와 이하 크기의 슬러지를 선별(80 mesh/0.2 mm STS Sieve) 및 분석하여 산정하였다. 호기성 그래뉼 슬러지의 EPS 함량은 포름알데히드(Formaldehyde)와 NaOH를 사용하여 추출하였으며(Liu and Fang, 2002) 추출된 단백질(PN)과 다당류(PS)는 Folin 시약(Lowry et al., 1951)과 Phenol-vitriol 방법(Herbert et al., 1971)을 사용하여 측정하였다. 호기성

Table 2. Experimental conditions of lab. scale reactor

Vol. (L)	Flow (L/day)	Cycles/day	pH	HRT (hrs)	SRT (days)	DO (mg/L)
5	15	6	7.0～7.5	8	15～20	1.0～2.0

Operation time for 1 cycle (min): Fill&React(10) → Oxic(210) → Settle(10) → Draw(10)
C/N ratio (mg COD/mg T-N): 10.0, 7.5, 5.0, and 2.5

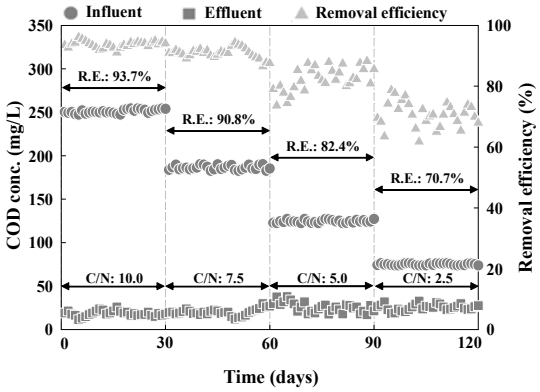

Fig. 2. COD concentration at different C/N ratio.

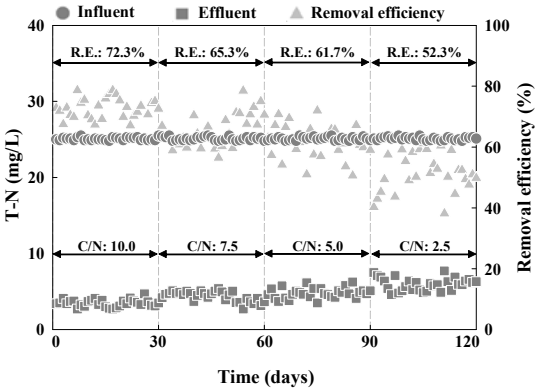

Fig. 3. T-N concentration at different C/N ratio.

그래뉼 슬러지의 외형 변화 및 표면 특성은 광학현미경(CX-31, Olympus, Japan)을 이용하였으며 채취된 슬러지를 0.17 mm 두께의 커버 글라스(Cover glass)로 덮어 40배율에서 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유기물 및 질소 제거효율

전체 운전기간 동안의 유기물 제거효율을 Fig. 2에 나타냈다. C/N비가 감소함에 따라 유기물 제거효율 또한 점차적으로 감소하는 경향을 나타냈으며, C/N비 10.0, 7.5, 5.0 및 2.5에서의 평균 제거효율은 각각 93.7, 90.8, 82.4 및 70.7%로 나타났다. 특히, C/N비 5.0과 2.5에서의 유기물 제거효율의 변동폭이 큰 것을 직관적으로 확인할 수 있었다. 기존 호기성 그래뉼 슬러지를 이용한 다양한 C/N비 조건에서의 유기물과 질소제거 효율을 평가한 Kocaturk and Erguder(2016)의 연구에서는 높은 C/N비(10, 20 및 30) 조건에서 유기물 제거효율이 약 90% 이상을 유지하였다고 보고하고 있으며, 상대적으로 낮은 C/N비(5.0, 3.5, 2.0 및 1.0)에서의 제거효율은 크게 저하된다고 보고하고 있어 본 연구와 유사한 경향을 나타냈다. 또한 이러한 원인을 높은 C/N비 조건에서의 종속 영양 미생물(Heterotrophic Bacteria) 우점화에 의한 결과로 설명하고 있으며 C/N비 비율이 높은 폐수가 유기물 제거에 더 적합하다고 보고하고 있다. Choi(2011)는 호기성 그래뉼 슬러지를 이용한 C/N비 2.0 이하 조건에서 89.4∼95.6%의 유기물 제거효율을 나타냈다고 보고하고 있으며 본 연구와는 다소 상이한 결과를 보고하고 있다. 이러한 원인은 상대적으로 높은 MLVSS 농도(5,200∼6,800 mg/L)를 유지하여 운전을 실시한 결과이기 때문인 것으로 판단된다.

C/N비에 따른 총질소의 거동을 살펴보면, C/N비가 낮아질수록 유기물 제거효율과 마찬가지로 총질소 제거효율 또한 점차적으로 감소하는 경향을 나타냈으며(Fig. 3), 특히, 가장 낮은 C/N비 2.5에서는 제거효율이 급격하게 감소하며 편차 또한 큰 것으로 나타났다. 이에 따라 C/N비 10.0, 7.5, 5.0 및 2.5에서의 평균 총질소 제거효율은 각각 72.3, 65.3, 61.7 및 52.3%로 나타났다. C/N비 10.0에서의 총질소 제거효율이 다소 높은 것은, 유입&반응 단계에서 질산성 질소의 탈질반응이 수행되었기 때문인 것으로 판단되며, 탈질 반응에 필요한 유기탄소원(유기물)이 충분히 공급되었음을 추론할 수 있다. 또한, 분석결과를 살펴보면 각 C/N비 조건에서의 총질소 제거효율의 표준편차(Standard Deviation)는 각각 3.7, 5.4, 5.4 및 6.7로 나타났으며, 전체 운전기간 동안 동일한 운전조건을 적용하였음에도 C/N비 10.0 → 7.5, 7.5 → 5.0, 5.0 → 2.5의 조건에서, 총질소 평균 제거효율은 각각 7.0, 3.6 및 9.4%가 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이에 따라 C/N비 7.5에서 5.0으로 낮아질 때, 다른 조건에 비하여 평균 제거효율의 저하가 상대적으로 낮은 것을 확인할 수 있었다. 이러한 C/N비 7.5, 5.0에서의 총질소 제거효율의 편차가 상대적으로 크지 않은 것은

공정을 장기간 운영함(3개월 운영 시점)에 따라 질산화, 탈질 미생물이 다소 우점화 되었기 때문인 것으로 판단된다(Eom and Kim, 2018). Mo et al.(2019)은 C/N비 2 이하에서는 총질소 제거효율이 감소하므로 C/N비 제어의 중요성을 강조하고 있다. 또한 He et al.(2019)은 낮은 C/N비(4.0) 조건에서 호기성 그래뉼 슬러지를 이용한 질소 제거효율을 평가를 위하여 포기량 제어를 통하여 동시 질산화, 탈질반응을 유도하였으며, 포기량을 1.5에서 0.9 L/min으로 감소시킨 결과, 질소 제거효율은 62.74에서 84.74%까지 상승하였음을 보고하고 있다. 따라서 본 연구에서 도출된 C/N비 5.0 이하에서의 낮은 총질소 제거효율은 포기량을 제어할 경우, 더욱 상승시킬 수 있을 것으로 판단되며, C/N비에 따라 질소 제거효율 상승을 위한 탄력적인 운전 제어전략이 필요함을 시사하고 있다.

3.2. MLSS 및 SVI_{30}

조건별 MLSS, AGS 농도 및 AGS/MLSS 비율의 거동과 SVI_{30}을 Fig. 4에 나타냈다. 본 연구의 운전초기 MLSS, 호기성 그래뉼 슬러지는 각각 2,870, 2,460 mg/L이었으며 AGS/MLSS 비율은 85.7%였다. 운전결과, C/N비 10.0에서 7.5까지는 MLSS, AGS 모두 상승하는 경향을 나타냈으며, C/N비 7.5의 경우, 운전종료 시점에서 각각 3,710, 3,200 mg/L를 나타내 AGS/MLSS 비율은 86.3%까지 증가하였다. 그러나 C/N비가 5.0에서 2.5까지 감소함에 따라 MLSS, AGS는 감소하는 경향을 나타냈으며, 최종 운전종료 시점에서 각각 2,470, 1,820 mg/L를 나타내 AGS/MLSS 비율은 73.7%까지 감소하였다. Pijuan et al.(2011)은 호기성 그래뉼 슬러지의 안정적인 유지를 위하여 초기 AGS/MLSS 비율의 중요성을 보고하고 있으며, Ni et al.(2009)은 85%의 AGS/MLSS 비율을 얻기 위해서는 300일 이상의 운전기간이 필요함을 보고하였다. 본 운전결과를 통하여 서론에서 기술한 호기성 그래뉼 슬러지 형성에 영향을 미치는 다양한 변수 중 C/N비는 그래뉼 안정성에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 유입수 C/N비는 그래뉼 크기와의 상관관계가 있는 것으로 보고되고 있으며(Luo et al., 2014), C/N비가 5.0 이하일 경우, 그래뉼의 생리학적(physiochemical) 특성에 영향을 미쳐 크기가 급격하게 감소되는 것으로 보고되고 있다(Yang et al., 2005; Liu et al., 2007). 따라서, 안정적인 그래뉼 유지를 위하여 C/N비 5.0 이상을 유지할 필요가 있을 것으로 판단된다.

슬러지 침전성(SVI_{30})의 경우, MLSS, 호기성 그래뉼 슬러지 농도와 유사한 경향을 나타냈으며 C/N비가 감소함에 따라 침전성이 다소 불량한 슬러지가 발생하여 점차적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 초기 82 mL/g의 슬러지 침전성은 C/N비가 감소함에 따라 지속적으로 증가하여 운전종료 시, 102 mL/g를 나타냈다. Kocaturk and Erguder(2016)은 C/N비를 7.5에서 1.0까지 감소시키며 호기성 그래뉼 슬러지의 침전성을 분석한 결과, 43에서 62 mL/g까지 증가하는 결과를 나타내 본 연구와 유사한 경향을 나타냈다. 이러한 결과는 운전이 지속될수록 낮은 C/N비로 인하여 호기성 그래뉼 슬러지의 비율이 감소하여 침전성에 영향을 미쳤기 때문인 것으로 판단된다. He et al.(2018)은 반응조 포기시간을 120, 90 및 60분으로 단계적으로 감소시킨 결과, 슬러지 농도 비율(MLVSS/MLSS)은 0.82에서 0.90까지 증가하며, 침전성(SVI_2)은 약 53에서 39 mL/g까지 낮아지는 결과를 보고하고 있다. 또한, He et al.(2019)은 C/N비 4.0 조건에서 폭기량을 1.5, 0.9 및 0.6 L/min으로 단계적으로 감소시키며, 반응조의 짧은 침전시간(2 min)을 유지한 결과, 침전성(SVI_2)은 약 105에서 50 mL/g까지 감소하여 침전성이 우수한 안정적인 그래뉼을 유지할 수 있음을 보고하고 있다. 따라서 C/N비 조건에 따라 포기시간, 침전시간 제어를 통하여 호기성 그래뉼 슬러지 안정성을 유지하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

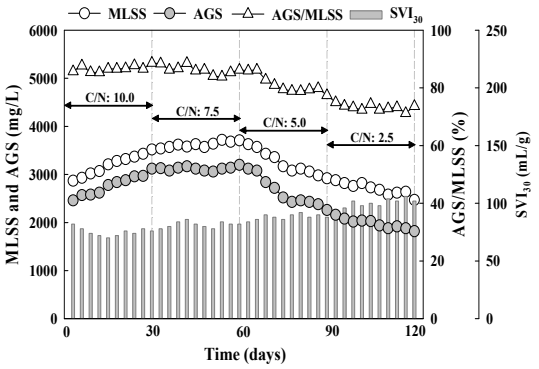

Fig. 4. MLSS, AGS concentration, AGS/MLSS and SVI_{30} value at different C/N ratio.

3.3. EPS 변화

호기성 그래뉼 슬러지의 단백질(PN), 다당류(PS) 함량 및 PS/PN ratio 값은 C/N비가 감소함에 따라 상이한 결과를 나타냈다(Fig. 5). C/N비가 10.0에서 2.5로 감소함에 따라 총 체외고분자 물질(EPS)은 100에서 109 mg/g MLVSS로 큰 편차는 없는 것을 확인할 수 있었으나 PN과 PS의 구성은 각기 다른 C/N비 조건에서 뚜렷한 편차를 나타냈다. C/N비가 감소함에 따라 단백질 함량은 68에서 83 mg/g MLVSS로 증가하는 경향을 나타냈으나 다당류의 경우, 반대로 42에서 26 mg/g MLVSS까지 감소하는 경향을 나타냈다. 이에 따른 PS/PN ratio는 초기 0.62에서 0.31까지 급격한 감소를 보였다. 다양한 연구에서 EPS는 호기성 그래뉼 슬러지의 형성 및 안정성에 영향을 미치는 주요 인자로 보고되고 있다(Sheng et al., 2010; Guo et al., 2012). 또한 Liu et al.(2019)은 미세분말 건조 슬러지를 첨가하여 호기성 그래뉼 슬러지의 PS, PN 분석을 수행하였으며, 초기 약 40 mg/g MLVSS의 다당류는 건조 슬러지 첨가 후 안정적인 그래뉼을 형성한 후, 약 52 mg/g MLVSS까지 함량이 증가된다고 보고하고 있어, 낮은 C/N비에서의 다당류 함량 감소결과를 나타낸 본 연구와 유사한 경향을 나타냈다. 본 연구결과를 통하여 낮은 C/N비 조건은 호기성 그래뉼 슬러지의 안정성에 직접적으로 영향을 미치며 체외고분자 물질의 구성물질 중 다당류 함량에 영향을 미쳐 그래뉼 유지 및 안정성에 불리한 조건이 형성됨을 직접적으로 확인할 수 있었다.

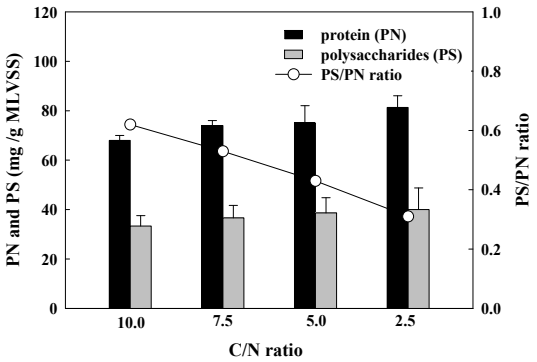

Fig. 5. Protein, polysaccharides and PN/PS ratio value at different C/N ratio.

3.4 광학현미경 관찰

Fig. 6에는 조건별 광학현미경을 이용한 호기성 그래뉼 슬러지의 관찰결과((a)~(d))와 사상균을 관찰한 Liu et al.(2019)의 관찰결과((e)~(h))를 나타냈다. C/N비

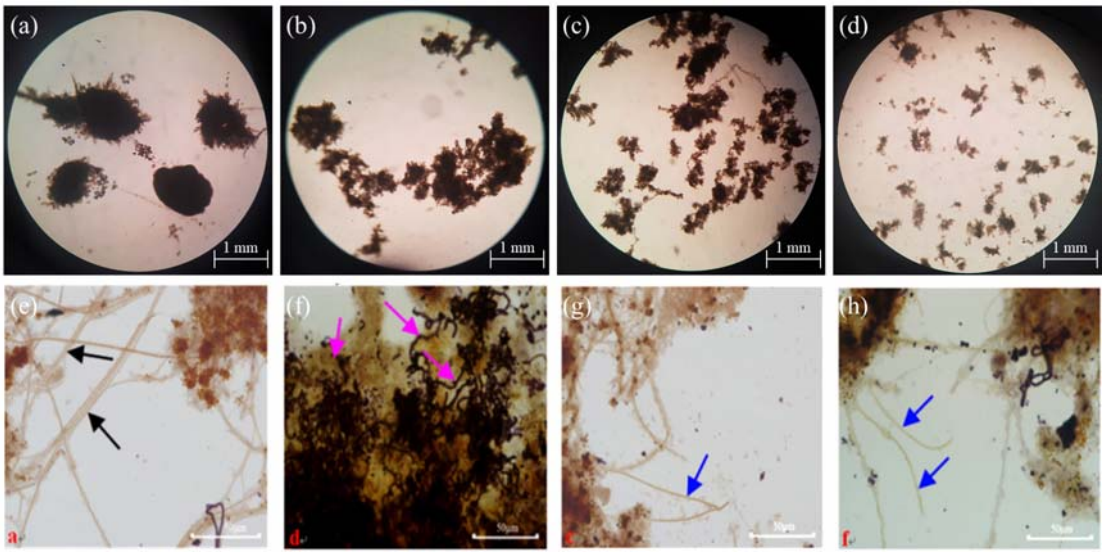

Fig. 6. Morphology observation of AGS at different C/N ratio, ((a) 10.0; (b) 7.5; (c) 5.0; (d) 2.5, (40 magnification by optical microscope), (e)~(h) filamentous bacteria in AGS (Liu et al., 2019).

10.0 조건에서의 슬러지는 운전을 지속함에 따라 약 0.8~1.0 mm 크기를 유지하였으나, C/N비가 감소함에 따라 점차적으로 크기가 줄어드는 것을 직관적으로 관찰할 수 있었다. 낮은 C/N비 조건에서의 그래뉼 크기 감소는 AGS/MLSS 비율이 감소함에 따른 결과로 판단된다. 이와 더불어 C/N비가 감소함에 따라 슬러지는 표면에 미세한 털 모양이 관찰되었으며, 이는 사상균이 다소 증가한 것으로 판단된다(Martins et al., 2004; Liu and Liu, 2006). 또한, Liu et al.(2019)이 제시한 사상균의 형태에서는 본 연구에서 관찰된 슬러지 표면과 유사한 느슨한 구조의 섬유질 모양의 표면형태를 관찰할 수 있었다. 사상균의 성장은 활성슬러지와 호기성 그래뉼 슬러지에서 관찰될 수 있으며 슬러지 벌킹의 원인이 되는 것으로 보고되고 있다(Tay et al., 2001). 종합적으로 본 연구에서는 C/N비가 감소함에 따라 그래뉼이 붕괴되는 경향을 나타내 그래뉼 안정성에 큰 영향을 미치는 것을 직·간접적으로 확인할 수 있었으며 적절한 C/N비 제어(외부탄소원 주입)와 운전방법 제어(포기시간, 침전시간)를 통한 그래뉼 안정성 향상에 관한 후속 연구의 필요성을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 C/N비 변화에 따른 호기성 그래뉼 슬러지의 안정성에 미치는 영향을 평가하였다. 이에 따라 연속회분식 공정을 이용하여 유입수 C/N비를 10.0, 7.5, 5.0 및 2.5로 조절하였다. 연구결과, C/N비가 감소함에 따라 유기물, 총질소의 제거효율도 동시에 감소하는 결과를 나타내 C/N비 2.5에서의 유기물, 총질소 제거효율은 각각 70.7, 52.3%로 나타났다. AGS/MLSS의 비율은 초기 85.7에서 73.7%까지 감소하는 경향을 나타냈으며, 침전성은 초기 82에서 102 mL/g을 나타내 그래뉼 안정성에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 동시에 체외고분자 물질 중, 다당류 함량의 뚜렷한 편차를 확인할 수 있었으며, C/N비가 감소함에 따라 PS/PN ratio는 초기 0.62에서 0.31까지 급격한 감소를 보였다. 또한, 광학현미경 관찰결과, C/N비 감소는 사상균의 성장을 유발함을 확인할 수 있었으며, 그래뉼 안정성에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업”으로 지원받은 과제임 (과제번호: 2016002190006)

REFERENCES

American Public Health Association (APHA), 2008, Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st edition, American public health association, Washington D.C., USA.

Arrojo, B., Mosquera-Corral, A., Garrido, J. M., Mendez, R., 2004, Aerobic granulation with industrial wastewater in sequencing batch reactors, Water Res., 38(14-15), 3389-3399.

Cai, W., Jin, M., Zhao, Z., Lei, Z., Zhang, Z., Adachi, Y., Lee, D. J., 2018, Influence of ferrous iron dosing strategy on aerobic granulation of activated sludge and bioavailability of phosphorus accumulated in granules, Bioresour. Technol. Rep., 2, 7-14.

Caluwé, M., Dobbeleers, T., D’aes, J., Miele, S., Akkermans, V., Daens, D., Geuens, L., Kiekens, F., Blust, R., Dries, J., 2017, Formation of aerobic granular sludge during the treatment of petrochemical waste -water, Bioresour. Technol., 238, 559-567.

Campo, R., Corsino, S. F., Torregrossa, M., Bella, G. D., 2018, The role of extracellular polymeric substances on aerobic granulation with stepwise increase of salinity, Sep. Purif. Technol., 195, 12-20.

Carrera, P., Campo, R., Méndez, R., Bella, G. D., Campos, J. L., Mosquera-Corral, A., Val del Rio, A., 2019, Does the feeding strategy enhance the aerobic granular sludge stability treating saline effluents?, Chemosphere, 226, 865-873.

Choi, S. W., 2011, Bio-kinetic and design analysis of a sequencing batch reactor by aerobic granular sludge, J. Korean Soc. Environ. Eng., 33(4), 275-280.

Corsino, S. F., di Biase, A., Devlin, T. R., Munz, G., Torregrossa, M., Oleszkiewicz, J. A., 2017, Effect of extended famine conditions on aerobic granular sludge stability in the treatment of brewery wastewater, Bioresour. Technol., 226, 150-157.

De Sousa Rollemberg, S. L., Barros, A. R. M., Firmino, P. I. M., dos Santos, A. B., 2018, Aerobic granular sludge: Cultivation parameters and removal mechanisms,

Bioresour. Technol., 270, 678-688.

Eom, H. K., Kim, S. C., 2018, A Study on the denitrification and microbial community characteristics by the change of C/N ratio of molasses and nitrate nitrogen, Korean J. Microbiol., 54(2), 105-112.

Guo, W. S., Ngo, H. H., Li, J. X., 2012, A Mini-review on membrane fouling, Bioresour. Technol., 122, 27-34.

He, Q., Chen, L., Zhang, S., Chen, R., Wang, H., 2019, Hydrodynamic shear force shaped the microbial community and function in the aerobic granular sequencing batch reactors for low carbon to nitrogen (C/N) municipal wastewater treatment, Bioresour. Technol., 271, 48-58.

He, Q., Chen, L., Zhang, S., Wang, L., Liang, J., Xia, W., Wang, H., Zhou, J., 2018, Simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal in aerobic granular sequencing batch reactors with high aeration intensity: Impact of aeration time, Bioresour. Technol., 263, 214-222.

Herbert, D., Philipps, P. J., Strange, R. E., 1971, Carbohydrate analysis, Methods Enzymol. B., 5, 265-277.

Kishida, N., Tsuneda, J., Kim, J. H., Sudo, R., 2009, Simultaneous nitrogen phosphorus removal from high-strength industrial wastewater using aerobic granular sludge, J. Environ. Eng., 135(3), 153-158.

Kocaturk, I., Erguder, T. H., 2016, Influent COD/TAN ratio affects the carbon and nitrogen removal efficiency and stability of aerobic granules, Ecol. Eng., 90, 12-24.

Liu, H., Fang, H. H. P., 2002, Extraction of Extracellular polymeric Substances (EPS) of sludges, J. Biotechnol., 95, 249-256.

Liu, J., Li, J., Xie, K., Sellarmuthu, B., 2019, Role of adding dried sludge micropowder in aerobic granular sludge reactor with extended filamentous bacteria, Bioresour. Technol. Rep., 5, 51-58.

Liu, Y., Liu, Q. S., 2006, Research and implementation of 3D assembly animate based on B/S structure, Biotechnol. Adv., 24, 115-117.

Liu, Y. Q., Liu, Y., Tay, J. H., 2004, The effects of extracellular polymeric substances on the formation and stability of biogranules, Appl. Microbiol. Biotechnol., 65, 143-148.

Liu, Y. Q., Moy, B. Y. P., Tay, J. H., 2007, COD removal and nitrification of low-strength domestic wastewaterin aerobic granular sludge sequencing batch reactors, Enzyme Microb. Technol., 42, 23-28.

Long, B., Xuan, X., Yang, C., Zhang, L., Cheng, Y., Wang, J., 2019, Stability of aerobic granular sludge in a pilot scale sequencing batch reactor enhanced by granular particle size control, Chemosphere, 225, 460-469.

Lowry, O. H., Rosebrough, N. J., Farr, A. L., Randall, R. J., 1951, Protein measurement with the Folin phenol reagent, J. Biol. Chem., 193, 265-275.

Luo, J., Hao, T., Wei, L., Mackey, H. R., Lin, Z., Chen, G. H., 2014, Impact of influent COD/N ratio on disintegration of aerobic granular sludge, Water Res., 62, 127-135.

Martins, A. M. P., Pagilla, K., Heijnen, J. J., van Loosdrecht, M. C. M., 2004, Filamentous bulking sludge－a critical review, Water Res., 38(4), 793-817.

Mo, W. J., Kim, H. Y., Choi, H. N., 2019, The operation characteristics of advanced sewage treatment process using aerobic granular gludge in pilot plant, J. Korean Soc. Environ. Eng., 41(2), 61-68.

Ni, B. J., Xie, W. M., Liu, S. G., Yu, H. Q., Wang, Y. Z., Wang, G., Dai, X. L., 2009, Granulation of activated sludge in a pilot-scale sequencing batch reactor for the treatment of low-strength municipal wastewater, Water Res., 43(3), 751-761.

Pijuan, M., Werner, U., Yuan, Z., 2011, Reducing the startup time of aerobic granular sludge reactors through seeding floccular sludge with crushed aerobic granules, Water Res., 45(16), 5075-5083.

Ren, Y., Ferraz, F., Lashkarizadeh, M., Yuan, Q., 2017, Comparing young landfill leachate treatment efficiency and process stability using aerobic granular sludge and suspended growth activated sludge, J. Water Proc. Eng., 17, 161-167.

Sheng, G. P., Yu, H. Q., Li, X. Y., 2010, Extracellular Polymeric Substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: a review, Biotechnol. Adv., 28, 882-894.

Su, K. Z., Ni, B. J., Yu, H. Q., 2013, Modeling and optimization of granulation process of activated sludge in sequencing batch reactors, Biotechnol. Bioeng., 110(5), 1312-1322.

Szabó, E., Hermansson, M., Modin, O., Persson, F.,

Wilén, B. M., 2016, Effects of wash-out dynamics on nitrifying bacteria in aerobic granular sludge during start-up at gradually decreased settling time, Water, 8(5), 172.

Tay, J. H., Liu, Q. S., Liu, Y., 2001, Microscopic observation of aerobic granulation in sequential aerobic sludge blanket reactor, J. Appl. Microbiol., 91, 168-175.

Vashi, H., Iorhemen, O. T., Tay, J. H., 2018, Degradation of industrial tannin and lignin from pulp mill effluent by aerobic granular sludge technology, J. Water Proc. Eng., 26, 38-45.

Wang, S. G., Liu, X. W., Gong, W. X., Gao, B. Y., Zhang, D. H., Yu, H. Q., 2007, Aerobic granulation with brewery wastewater in a sequencing batch reactor, Bioresour. Technol., 98, 2142-2147.

Wang, Z., Gao, M., She, Z., Wang, S., Jin, C., Zhao, Y., Yang, S., Guo, L., 2015, Effects of salinity on performance, extracellular polymeric substances and microbial community of an aerobic granular sequencing batch reactor, Sep. Purif. Technol., 144, 223-231.

Wei, D., Wang, Y., Wang, X., Li, M., Han, F., Ju, L., Zhang, G., Shi, L., Li, K., Wang, B., Du, B., Wei, Q., 2015, Toxicity assessment of 4-chlorophenol to aerobic granular sludge and its interaction with extracellular polymeric substances, J. Hazard Mater., 289, 101-107.

Wu, L., Peng, C. Y., Peng, Y. Z., Li, L. Y., Wang, S. Y., Ma, Y., 2012, Effect of wastewater COD/N ratio on aerobic nitrifying sludge granulation and microbial population shift, J. Environ. Sci., 24(2), 234-241.

Yang, S. F., Tay, J. H., Liu, Y., 2005, Effect of substrate nitrogen/chemical oxygen demand ratio on the formation of aerobic granules, J. Environ. Eng., 131(1), 86-92.

Yuan, Q., Gong, H., Xi, H., Xu, H., Zhengyu, J., Ali, N., Wang, K., 2019, Strategies to improve aerobic granular sludge stability and nitrogen removal based on feeding mode and substrate, J. Environ. Sci., 84, 144-154.

Zhang, Z., Cao, R., Jin, L., Zhu, W., Ji, Y., Xu, X., Zhu, L., 2019, The regulation of N-acyl-homoserine lactones (AHLs)-based quorum sensing on EPS secretion via ATP synthetic for the stability of aerobic granular sludge, Sci. Total Environ., 673, 89-91.

Zhu, L., Lv, M. L., Dai, X., Yu, Y. W., Qi, H. Y., Xu, X. Y., 2012, Role and significance of extracellular polymeric substances on the property of aerobic granule, Bioresour. Technol., 107, 46-54.

• 김현구, 주식회사 블루뱅크 연구소장
hgkim@bluebank.kr
• 안대희, 명지대학교 환경에너지공학과 교수
dhahn@mju.ac.kr